doi:10.13866/j.azr.2019.04.08

中间锦鸡儿冠层降雨再分配特征①

田 娜[1,2]， 古君龙[1,2]， 杨新国[1,2]， 王 磊[1,2]， 王 兴[1,2]，
陈 林[1,2]， 宋乃平[1,2]

（1. 宁夏大学西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室，宁夏 银川 750021；
2. 宁夏大学西北土地退化与生态恢复省部共建国家重点实验室培育基地，宁夏 银川 750021）

摘 要：以荒漠草原人工中间锦鸡儿（*Caragana intermedia*）灌丛为对象，研究降雨量及降雨强度对两类形态灌丛（健康组和退化组）穿透雨、树干茎流和冠层截留的影响。结果表明：① 试验期间共观测到有效降雨 33 次，以中小降雨事件为主，总降雨量为 251 mm，次平均降雨量和平均降雨强度分别为 7.6 mm 和1.14 mm · h^{-1}，其中降雨量 < 2 mm，降雨强度 < 1 mm · h^{-1} 的降雨事件出现次数最多。② 健康组和退化组中间锦鸡儿平均穿透雨率、树干茎流率和冠层截留率分别为 66.7%、8.5%、24.8% 和 75.4%、8.7%、16.0%，两类形态灌丛之间穿透雨和截留存在显著差异（$P<0.05$）。③ 两类形态灌丛的穿透雨量、树干茎流量、截留量与降雨量成线性函数、对数函数和幂函数关系，且其穿透雨率、树干茎流率和截留率与降雨量、降雨强度之间成对数函数和幂函数关系。灌丛形态退化显著改变了冠层降雨再分配格局，冠层截留显著降低，穿透雨显著增加，潜在提高了降水对土壤水分的直接补充，一定程度上有利于人工中间锦鸡儿稳定性的维持。

关键词：荒漠草原；中间锦鸡儿；穿透雨；树干茎流；截留；形态退化；毛乌素沙地

降雨是干旱半干旱区的主要水源，也是植物生长的关键驱动因素之一[1-3]。灌丛对降雨的再分配功能是荒漠草原生态系统重要的水文生态功能之一，降雨通过植被冠层会被分割为穿透雨、树干茎流和冠层截留 3 个部分[4-6]。降雨通过冠层再分配作用以穿透雨和树干茎流的形式到达地面，改变了降雨在冠层下的水平空间格局及土壤表面的降雨入渗率[7-8]。作为土壤—植物—大气连续体系统（SPAC）水循环过程中的关键环节，冠层降雨再分配对养分循环、植被恢复等具有积极作用[9-12]。因此，研究灌丛冠层降雨再分配过程，对于理解植被对降雨的利用方式，揭示植被冠层下的生态水文机理及其适应性管理具有重要的理论和应用价值。

目前，关于植被冠层降雨再分配的研究大多集中在热带雨林等的乔木林[13-16]，同时，对树干液流等方面的研究也较丰富[17-20]，而对干旱半干旱区植被冠层降雨再分配特征的研究较少。Carlyle-Moses[21]研究了墨西哥东北部马德雷盆地 4 种灌木的降雨再分配特征，表明不同物种的冠层降雨再分配特征具有显著差异，这与灌丛形态的差异性和气象因素有关。杨志鹏等[22]研究了毛乌素沙地沙柳（*Salix psammophila*）灌丛降雨截留与树干茎流特征，表明沙柳灌丛的降雨截留量、穿透雨量和树干茎流量与降雨量之间均呈显著正相关，且双曲线函数能较好地表达截留量、穿透雨量和树干茎流量占降雨量百分比随降雨量的变化。荐圣淇等[8]研究了黄土高原丘陵沟壑区柠条（*Caragana korshinskii*）和沙棘（*Hippophae rhamnoides*）的降雨截留特征，结果显示柠条和沙棘截留量、穿透雨量和树干茎流量占降雨量比例不同，且两类灌木的截留量、穿透雨量和树干茎流量与降雨量均呈显著正相关，截留率、穿透雨率和树干茎流率与降雨量、最大 10 min 雨强的关系用指数函数或幂函数描述较好。上述研究对理解不同灌丛类型降雨再分配过程的生态水文机理具有重要作用。

中间锦鸡儿（*Caragana intermedia*）为豆科锦鸡儿属旱生落叶灌木，是我国干旱半干旱区重要的防风固沙植物及人工植被恢复优势物种，具有较强的

① **收稿日期：**2018-11-23； **修订日期：**2018-12-07
基金项目：国家自然科学基金（31460161）；宁夏大学西部一流学科建设项目（NXYLXK2017B06）；宁夏大学西部一流大学建设项目（GZXM2017001）
作者简介：田娜（1994-），女，在读硕士研究生，研究方向为土地退化的生态恢复. E-mail：tianna0068@163.com
通讯作者：杨新国. E-mail：xinguoyang1976@163.com

生命力和抗逆性[23]。但受林龄逐年增加和林地土壤干燥化的不利影响,诸如土壤旱化、灌丛退化及群落结构改变等现象突出[24-25]。作为荒漠草原人工中间锦鸡儿老化的一种典型表现形式,灌丛退化是否会显著影响冠层降雨再分配过程,进而影响灌丛自身对降雨的有效利用及其对干旱环境胁迫的适应,对于深入认识人工植被的稳定性维持机制具有重要的研究意义。本研究选取荒漠草原带状人工中间锦鸡儿典型退化灌丛为对象(退化组),以临近的自然散生中间锦鸡儿灌丛为对照(健康组),研究不同降雨事件下,降雨量及降雨强度对两类形态灌丛(健康组和退化组)穿透雨、树干茎流和冠层截留的影响,分析冠层降雨再分配格局,穿透雨、树干茎流和冠层截留的变化特征及降雨强度与穿透雨率、树干茎流率和截留率的关系等,以此阐明中间锦鸡儿灌丛冠层降雨再分配特征。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

试验于 2016 年 8—10 月和 2017 年 7—8 月在距盐池县城东北 8 km 的皖记沟村进行。试验区位于毛乌素沙地南缘(37°50′N,107°30′E),海拔 1 400 m,地处鄂尔多斯台地向黄土高原过渡地带。该区属中温带大陆性气候,年平均气温为 7.7 ℃,年平均降水量为 290.3 mm,年内降水分布不均匀,主要集中在 6—8 月;年日照时数 2 863.1 h,蒸发量 2 136 mm。地貌形态以鄂尔多斯缓坡高原为主,主要地带性土壤为灰钙土,非地带性土壤以风沙土、黑垆土等为主,此外还有黄土及少量的岩土和白浆土等。

研究区植被类型包括灌丛、草原、草甸、沙生植被和荒漠植被等,以灌丛、草原和沙生植被广泛分布为主。其中,灌丛主要为自然或人工中间锦鸡儿灌木林。人工林配置方式为两行一带,带距 6 ~ 8 m,株行距均为 1 m[26]。自然散生中间锦鸡儿灌丛大多出现在行生人工林边缘。

1.2　研究方法

经过野外调查,研究区存在人工种植和自然散生两类中间锦鸡儿林,两类灌丛外貌形态存在显著差别。退化中间锦鸡儿集中出现在行生林(退化组),而外貌形态发育正常,植丛生长健壮的中间锦鸡儿多出现在散生林(健康组)。随机选择散生林和行生林片区的 6 丛具有形态代表性的中间锦鸡儿作为健康组和退化组的试验样本,进行穿透雨和树干茎流的观测。同时,测定两类灌丛的高度、冠幅面积、基径、叶面积等形态参数(表 1)。

表 1　试验期间两类形态灌丛的统计特征

Tab. 1　Descriptive statistics (mean ± SE) of two morphological shrubberies selected in the experiments

	茎				冠层		
	分枝数	基径/cm	枝长/cm	角度/(°)	高度/cm	冠幅面积/m²	叶面积/m²
健康组	20.00 ± 2.63	1.23 ± 0.15	100.05 ± 10.46	59.28 ± 3.07	125.00 ± 13.05	0.13 ± 0.03	0.41 ± 0.11
退化组	39.00 ± 3.39	0.79 ± 0.07	69.79 ± 0.83	51.48 ± 1.15	103.00 ± 2.26	0.08 ± 0.01	0.18 ± 0.03

1.2.1　降雨观测　在研究区林外空旷地上安置自动气象站采集装置,用以连续实时监测大气降雨。不同降雨事件记录时间间隔为 1 h。若雨歇时间不足 4 h,仍记作 1 次降雨。

1.2.2　穿透雨观测　采用直径为 13 cm、外缘高 2 cm 的聚乙烯漏斗和外缘高 2 cm 的聚乙烯瓶收集穿透雨。按照 0°、90°、180°、270°辐射方向(即正北、正东、正南、正西 4 个方向),将聚乙烯漏斗放置在以灌木基部为圆心的半径上。因两类形态中间锦鸡儿冠幅大小不同,二者收集装置数量存在差异,健康组和退化组中间锦鸡儿每个方向上分别由内到外放置 3 个漏斗和 2 个漏斗,距灌丛中心的距离分别为 40 cm、80 cm 和 120 cm 及 40 cm 和 80 cm。健康组和退化组中间锦鸡儿灌丛最外层穿透雨收集装置均为大气降雨收集装置。每次降雨结束后,及时将收集装置内收集的雨水倒入实验用标准量筒(规格:1 000 mL,最小分度值 5 mL)中,并读取体积。用所测穿透雨量除以容器盛装降雨的面积,将每株灌丛下承接的雨量加权平均,即为该次降雨下灌丛冠层的穿透雨量[27]。

1.2.3　树干茎流观测　本实验采用自制的导流水槽装置测定灌丛树干茎流,装置高约 5 cm。在距离地面约 8 cm 处,用防水铝箔胶带将经过砂纸打磨呈“V”形的树干基部缠绕约一周半,确保树干与胶带间密封无缝隙。将类似“烟斗”的环形导流水槽与直径约 1 cm 的软吸管一端连接用于导水,另一端伸

入聚乙烯瓶用于盛装树干茎流，并用实验用标准量筒（规格：1 000 mL，最小分度值 0.1 mL）测定集水量。用树干茎流量体积除以灌木投影面积，即可求得树干茎流量[28-29]。计算公式为：

$$SF = \sum_{i=1}^{n} \frac{C_i \cdot M_i}{1\ 000A_s} \quad (1)$$

式中：SF 为树干茎流量（mm）；n 为枝干个数；C_i 为每枝条平均树干茎流体积（mL）；M_i 为单株枝干数；A_s 为植株的投影面积。

1.2.4 冠层截留量计算 根据水量平衡原理，利用测得的降雨量、穿透雨和树干茎流，可得冠层截留量计算公式为：

$$I = P - TF - SF \quad (2)$$

式中：I 为冠层截留量（mm）；P 为降雨量（mm）；TF 为穿透雨量（mm）；SF 为茎流量（mm）。

1.3 数据处理

采用 Microsoft Excel 2010 整理分析数据，统计学数据取平均值标准误。穿透雨量、树干茎流量和截留量与降雨量的比值即为穿透雨率、树干茎流率和截留率。运用 SPSS 20.0 统计软件对两类形态灌丛（健康组和退化组）的降雨量和降雨强度与穿透雨、树干茎流和截留进行回归分析和曲线拟合，显著性水平设定为 $\alpha = 0.05$。

2 结果与分析

2.1 试验期间的降雨统计分布特征

试验期间共观测到降雨 33 次，总降雨量为 251 mm，次降雨量最大值为 40.2 mm，最小值为 0.2 mm，平均降雨量为 7.6 mm（图 1）。将降雨期间降雨量分为 7 个等级，其中，2 mm 降雨出现频率最高，所占比例为 36.4%；而雨量级为 15～20 mm 和 35 mm 的降雨仅有 1 次。雨量级 15 mm 的降雨事件所占比例为 87.9%，15 mm 的降雨占 12.1%，呈明显的偏态分布（表 2）。

降雨强度变化范围为 0.2～3.7 mm·h^{-1}，平均降雨强度为 1.14 mm·h^{-1}。总体来看，整个观测期间以雨量 2 mm，雨强 1 mm·h^{-1}的降雨事件出现次数最多。

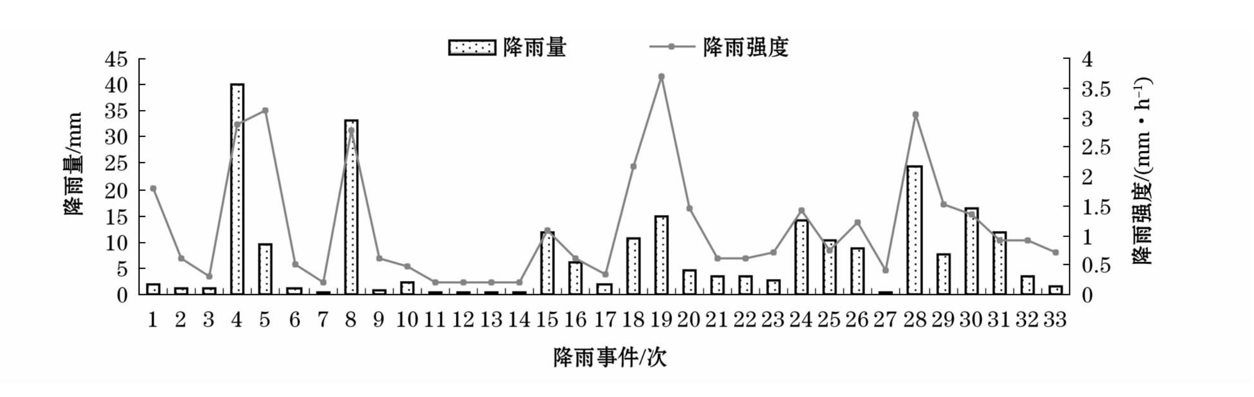


图 1 2016—2017 年降雨量的分布和降雨强度的变化

Fig. 1 Variation of rainfall distribution and rainfall intensity during the period of 2016－2017

表 2 2016—2017 年研究区的降雨特征

Tab. 2 Characteristics of rainfall in the study area during the period of 2016－2017

降雨量级/mm	降雨次数		降雨量		平均降雨强度/(mm·h^{-1})
	次数	占比/%	平均值/mm	占比/%	
<2	12	36.36	8.6	3.43	0.37
2～5	7	21.21	22.4	8.92	0.66
5～10	4	12.12	31.6	12.59	1.44
10～15	6	18.18	74.2	29.56	1.69
15～20	1	3.03	16.4	6.53	1.37
20～35	2	6.06	57.6	22.95	2.88
>35	1	3.03	40.2	16.02	2.87

2.2 冠层降雨再分配格局

在观测的 33 场降雨中，共收集到穿透雨和树干茎流 26 次。26 次降雨事件中，全部中间锦鸡儿灌丛的穿透雨、树干茎流和截留损失的分配比例随降雨量的动态变化见图 2。

穿透雨量为 0.1～35.0 mm，穿透雨率为 25.5%～87.2%；茎流量为 2×10^{-4}～4.6 mm，茎流率为 0.1%～15.4%；截留量为 0.1～3.3 mm，截留率为 2.1%～74.4%。整体来看，随着降雨量的增加，截留量的波动范围减小，穿透雨量呈现出类幂函数增加趋势。当降雨量较小（4.4 mm）时，产生的树干茎流量较小，可忽略不计。总体而言，穿透雨量在

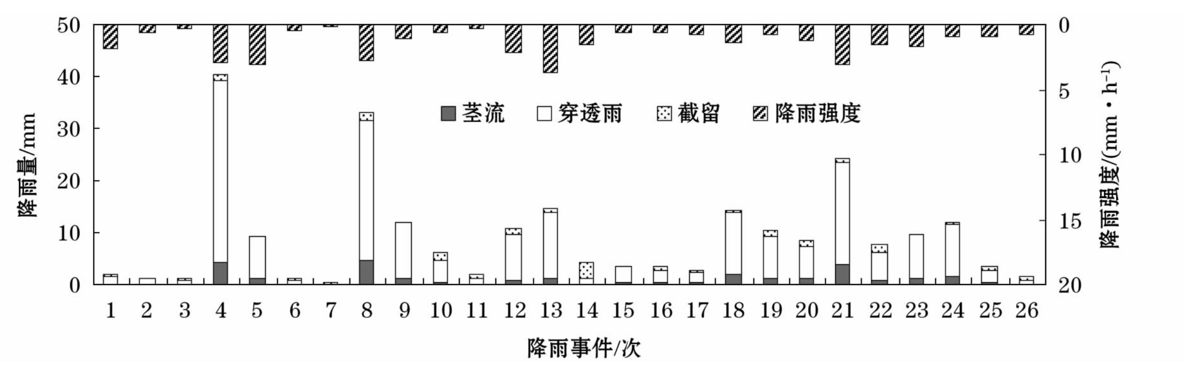
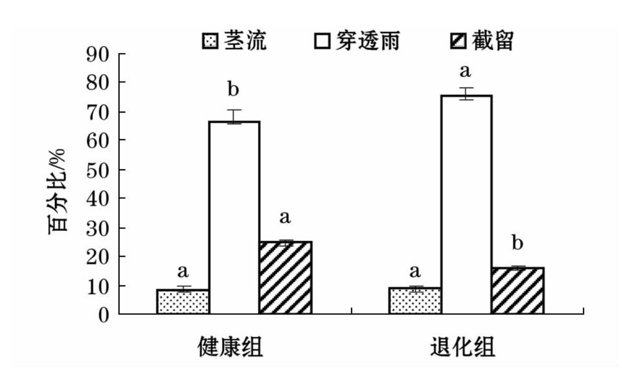


图 2　冠层降雨再分配格局随降雨量的动态变化

Fig. 2　Dynamic variation of the redistribution pattern of canopy rainfall with rainfall



注：不同字母表示健康组和退化组穿透雨率，茎流率和截留率差异显著（$P<0.05$）。

图 3　健康组和退化组中间锦鸡儿平均穿透雨率、树干茎流率和截留率的对比分析

Fig. 3　Comparative analysis of average percentages of throughfall, stemflow and interception between the healthy and degenerated groups

降雨分配中所占比例最大，且降雨量大小会影响树干茎流和截留量的产生。

健康组和退化组中间锦鸡儿平均穿透雨率、树干茎流率和冠层截留率分别为 66.7%、8.5%、24.8% 和 75.4%、8.7%、16.0%（图 3）。健康组和退化组中间锦鸡儿之间穿透雨和冠层截留具有显著差异性（分别为 $P=0.010$，$P=0.007$）。总体上，灌丛形态结构的退化，增加了灌丛下穿透雨量，减少了冠层对降雨的截留。

2.3　穿透雨变化特征

健康组中间锦鸡儿累积穿透雨量为 185.5 mm，平均穿透雨量为 7.1 mm，最大值为 35.1 mm，占次降雨量的 87.4%，最小值为 0.1 mm，占次降雨量的 41.6%。退化组中间锦鸡儿累积穿透雨量为 191.9 mm，平均穿透雨量为 7.4 mm，最大值为 35.0 mm，占次降雨量的 87.0%，最小值为 0.2 mm，占次降雨量的 75.7%。通过回归分析与曲线拟合，健康组和退化组中间锦鸡儿降雨量与穿透雨量、穿透雨率的变化关系如图 4 所示。穿透雨量和降雨量之间呈极显著正相关（$P<0.01$），穿透雨率随降雨量的变化呈对数函数增长趋势（$P<0.01$）。当降雨量较小（<10 mm）时，穿透雨率随降雨量的增加迅速增加，当超过一定雨量范围时，穿透雨率逐渐趋于稳定。

2.4　树干茎流变化特征

试验期间，健康组中间锦鸡儿树干茎流总量为

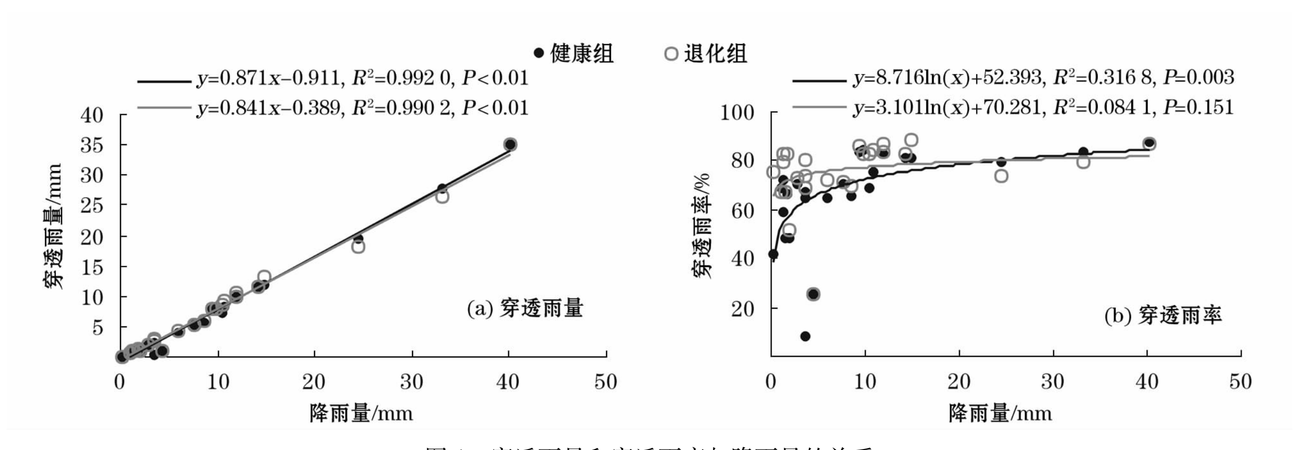


图 4　穿透雨量和穿透雨率与降雨量的关系

Fig. 4　Relationships between the throughfall and throughfall percentage and the rainfall

25.9 mm,平均树干茎流量为 0.6 mm,树干茎流最大值为 4.5 mm,占次降雨量的 13.5%,最小值为 0.003 mm,占次降雨量的 0.2%。退化组中间锦鸡儿树干茎流总量为 29.5 mm,平均树干茎流量为1.1 mm,树干茎流最大值为 4.6 mm,占次降雨量的 14.0%。回归分析结果显示,健康组和退化组中间锦鸡儿降雨量与树干茎流量($P<0.01$)、茎流率($P<0.05$)分别用线性函数和对数函数拟合较好。根据线性方程可知,降雨量 <1.0 mm 时,两类形态灌丛(健康组和退化组)均无树干茎流产生,这与实际观测的降雨量 <1.4 mm,没有树干茎流基本吻合。树干茎流率随降雨量呈先增加后缓慢增加的变化趋势(图 5)。

2.5 截留变化特征

基于水量平衡公式(式 2),利用已测穿透雨量和树干茎流量,计算可得截留量。试验期间,健康组中间锦鸡儿累积截留量为 28.8 mm,平均截留量为 1.1 mm,最大值为 3.3 mm,占次降雨量的 74.2%,最小值为 0.1 mm,占次降雨量的 58.3%。退化组中间锦鸡儿累积截留量为 18.8 mm,平均截留量为 0.7 mm,最大值为 3.3 mm,占次降雨量的 74.6%,最小值为 0.05 mm,占次降雨量的 24.3%。通过回归分析与曲线拟合,幂函数($P<0.05$)可以描述健康组和退化组中间锦鸡儿的截留量和截留率随降雨量的变化过程。当降雨量 10 mm 时,两类形态灌丛(健康组和退化组)的截留量随降雨量的增加而迅速增加,之后变化缓慢并趋向稳定。两类形态灌丛(健康组和退化组)截留率分别为 0~90% 和 0~80%。总体上,健康组截留量和截留率变化幅度均大于退化组(图 6)。

2.6 穿透雨率、树干茎流率和截留率与降雨强度的关系

穿透雨率、树干茎流率和截留率与降雨强度均呈幂函数分布(图 7),两类形态灌丛(健康组和退化组)变化趋势相似。当降雨强度较小(1 mm·h^{-1})时,穿透雨率和树干茎流率随降雨强度的增加均呈

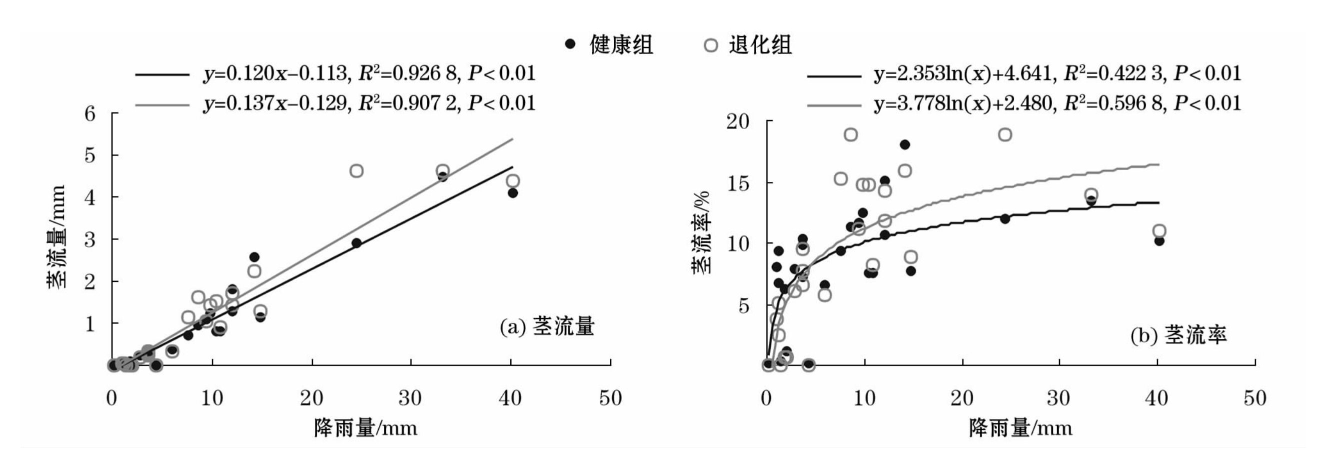


图 5 树干茎流量和茎流率与降雨量的关系

Fig. 5 Relationships between the stemflow and stemflow percentage and the rainfall

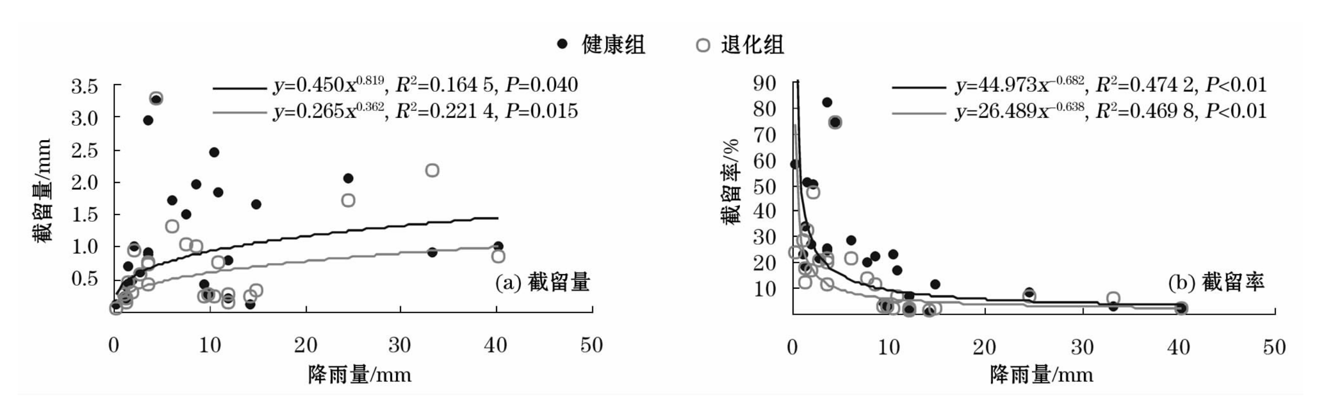


图 6 截留量和截留率与降雨量的关系

Fig. 6 Relationships between the interception and interception percentage and the rainfall

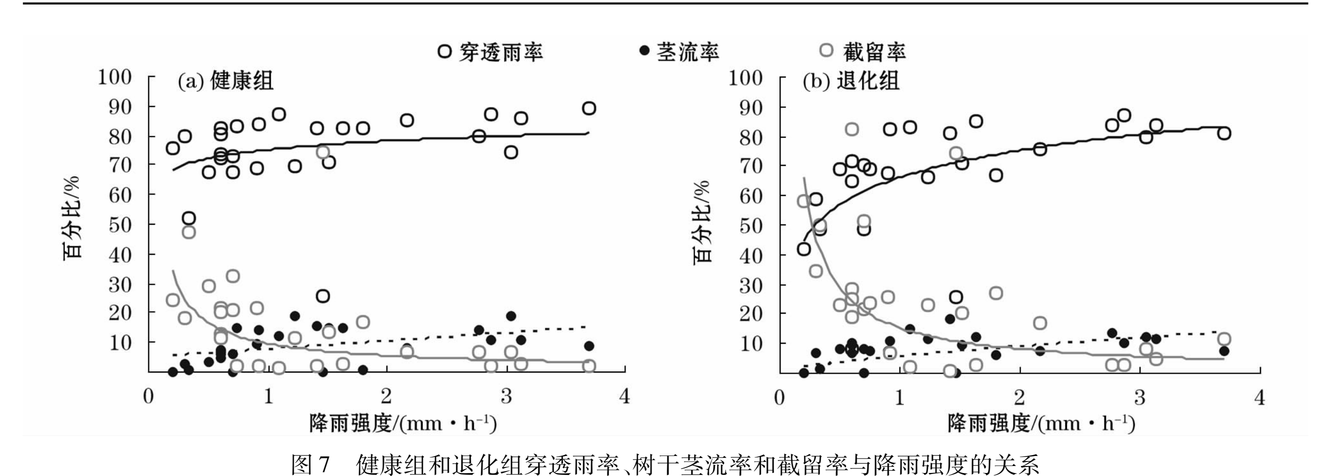


图 7　健康组和退化组穿透雨率、树干茎流率和截留率与降雨强度的关系

Fig. 7　Relationships between the percentages of throughfall, stemflow and interception and the rainfall intensity in the healthy and degenerated groups

增加趋势，而截留率则呈减小趋势；随着降雨强度持续增大，穿透雨率、树干茎流率和截留率基本趋于稳定。

曲线拟合方程结果显示，随着降雨强度的不断增加，健康组和退化组中间锦鸡儿穿透雨率、树干茎流率和截留率都趋于稳定（表 3）。由此可推测，在降雨后期，灌丛形态特征可能是影响穿透雨率、树干茎流率和截留率的主要因素。

表 3　图 7 曲线拟合方程

Tab. 3　Curve fitting equations of Figure 7

灌丛类型	拟合方程	R^2	P
健康组	$TFP_{(a)}=13.22\ln(RI)+66.14$	0.29	0.05
	$SFP_{(a)}=5.46RI^{0.69}$	0.16	<0.05
	$IP_{(a)}=-15.27RI^{-0.91}$	0.34	<0.01
退化组	$TFP_{(b)}=4.28\ln(RI)+75.19$	0.06	0.31
	$SFP_{(b)}=4.47RI^{0.97}$	0.17	<0.05
	$IP_{(b)}=9.61RI^{-0.79}$	0.29	<0.01

注：*TFP* 表示穿透雨率；*SFP* 表示茎流率；*IP* 表示截留率；*RI* 表示降雨强度。

3　讨　论

本研究区以中小降雨事件为主，降雨量 <2 mm，降雨强度为 <1 mm·h⁻¹的降雨事件出现次数最多。在此种降雨背景下，降雨量与两类形态灌丛（健康组和退化组）的穿透雨量、树干茎流量和冠层截留量呈线性函数、对数函数和幂函数分布，降雨强度与两类形态灌丛（健康组和退化组）的穿透雨率、树干茎流率和截留率呈对数函数和幂函数分布。对比其他干旱半干旱区研究结果，降雨量与穿透雨量、树干茎流量、截留量和穿透雨率、树干茎流率、截留率基本呈线性相关或二次函数分布[5,8,30-32]和对数函数、指数函数或幂函数分布[33-35]。在降雨特征值相近的情况下，曲线拟合结果不同，由此可以推测灌丛类别和形态特征会对降雨再分配结果产生影响。降雨初期，灌丛枝干、叶片具有较强的吸附和蒸发雨水的能力，截留量会随降雨量的增加显著增加，当降雨超出一定值时，叶片和枝干对雨水的吸附达到饱和，冠层对穿透雨的影响减弱，穿透雨量和截留量逐渐趋于稳定。而退化形态的中间锦鸡儿由于灌丛枝叶的退化缩小，其吸附和蒸发雨水的能力显著减弱，因此穿透雨率高于健康组，截留率低于健康组。

本研究中，两类形态灌丛（健康组和退化组）的平均穿透雨率、树干茎流率和截留率分别为66.7%、8.5%、24.8%和75.4%、8.7%、16.0%。这与科尔沁沙地小叶锦鸡儿灌丛的70.9%、4.0%和25.1%[33]，沙坡头腾格里沙漠东南缘柠条的75.32%、10.78%和13.93%[31]等降雨再分配各分量的研究结果相近。而在广西南宁、大兴安岭北部的桉树林和白桦天然林，其穿透雨量、树干茎流量、截留量分别占68%、0.6%、32%[36]和84.27%、3.68%、13.04%[37]，对比分析可知广西南宁和大兴安岭北部地区试验期间的降雨量分别为1 536 mm和465.8 mm，大约是本研究区的6.1倍和1.9倍。在干旱荒漠地区，因地下水埋藏太深，植被很难利用其来维持自身生长及一定水平的盖度，因此，对于荒漠区斑块状分布灌丛而言，植被冠层对降雨的分配会直接影响植物根际的土壤水分利用量。同时，三者研究对象存在形态（如冠幅面积和高度、叶面积大小、基径大小、分枝数等）上的差异。因此，降雨特征和植被形态特征

二者可能都会影响冠层降雨再分配过程。

对比分析可知,退化组中间锦鸡儿的穿透雨率高于健康组,而截留率明显低于健康组,且二者树干茎流率相差不大。这可能是由灌丛形态特征决定的。健康组中间锦鸡儿冠幅和叶面积均大于退化组,且冠层高度较高,不利于降雨穿透冠层向下滴落(表1)。同时,灌丛形态的退化使得叶面积和冠幅面积均显著减小,从而削弱了其对降雨的截留能力。以上研究可发现,穿透雨在两类形态灌丛(健康组和退化组)冠层降雨再分配中比例最大,表明穿透雨是灌丛有效水分的重要来源。形态退化使得退化中间锦鸡儿的穿透雨比例总体大于健康中间锦鸡儿,而截留率低于健康中间锦鸡儿,表明降雨对其的有效补充更大,进一步说明形态退化能够提高降雨转化为土壤水分的可行性。

4 结 论

健康组和退化组中间锦鸡儿平均穿透雨率、树干茎流率和冠层截留率分别为66.7%、8.5%、24.8%和75.4%、8.7%、16.0%,两类形态灌丛之间穿透雨和截留量存在显著差异($P<0.05$)。健康组和退化组中间锦鸡儿的穿透雨量、树干茎流量、截留量与降雨量之间的关系用线性函数、对数函数和幂函数描述较好,穿透雨率、树干茎流率和截留率与降雨量、降雨强度之间的关系用对数函数和幂函数描述较好。人工中间锦鸡儿形态特征的改变影响了冠层降雨再分配过程,灌丛形态退化显著增加了冠层下穿透雨,降低了冠层截留,进而有利于降水对灌丛下土壤水分的潜在补充,提高了灌丛对降雨的有效利用,这可能是荒漠草原区退化人工植被维持自身生存的一种水文途径。

参考文献(References):

〔1〕 商沙沙,廉丽姝,马婷,等. 近54 a中国西北地区气温和降水的时空变化特征〔J〕. 干旱区研究,2018,35(1):68－76.〔Shang Shasha,Lian Lishu,Ma Ting,et al. Spatiotemporal variation of temperature and precipitation in Northwest China in recent 54 years〔J〕. Arid Zone Research,2018,35(1):68－76.〕

〔2〕 Nielsen U N,Ball B A. Impacts of altered precipitation regimes on soil communities and biogeochemistry in arid and semi-arid ecosystems〔J〕. Global Change Biology,2015,21(4):1 407－1 421.

〔3〕 姚俊强,杨青,毛炜峄,等. 西北干旱区大气水分循环要素变化研究进展〔J〕. 干旱区研究,2018,35(2):269－276.〔Yao Junqiang,Yang Qing,Mao Weiyi,et al. Progress of study on variation of atmospheric water cycle factors over arid region in Northwest China〔J〕. Arid Zone Research,2018,35(2):269－276.〕

〔4〕 时忠杰,王彦辉,徐丽宏,等. 六盘山华山松(*Pinus armandii*)林降雨再分配及其空间变异特征〔J〕. 生态学报,2009,29(1):76－85.〔Shi Zhongjie,Wang Yanhui,Xu Lihong,et al. Rainfall redistribution and its spatial variation in the stand of *Pinus armandii* in the Liupan Mountains,China〔J〕. Acta Ecologica Sinica,2009,29(1):76－85.〕

〔5〕 马育军,高尚玉,李小雁,等. 高寒河谷灌丛冠层降雨再分配特征及影响因素〔J〕. 中国沙漠,2012,32(4):963－971.〔Ma Yujun,Gao Shangyu,Li Xiaoyan,et al. Rainfall canopy partitioning and its influencing factors of riparian shrub in the Alpine Region〔J〕. Journal of Desert Research,2012,32(4):963－971.〕

〔6〕 万艳芳,刘贤德,王顺利,等. 祁连山青海云杉林冠降雨再分配特征及影响因素〔J〕. 水土保持学报,2016,30(5):224－229.〔Wan Yanfang,Liu Xiande,Wang Shunli,et al. Rainfall canopy partitioning and its influencing factors of *Picea crassifolia* forest in the Qianlian Mountains〔J〕. Journal of Soil and Water Conservation,2016,30(5):224－229.〕

〔7〕 Cattan P,Ruy S M,Cabidoche Y M. Effect on runoff of rainfall redistribution by the impluvium-shaped canopy of banana cultivated on an andosol with a high infiltration rate〔J〕. Journal of Hydrology,2009,368(1－4):251－261.

〔8〕 荐圣淇,赵传燕,方书敏,等. 黄土高原丘陵沟壑区柠条和沙棘灌丛的降雨截留特征〔J〕. 应用生态学报,2012,23(9):2 383－2 389.〔Jian Shengqi,Zhao Chuanyan,Fang Shumin,et al. Characteristics of rainfall interception by *Caragana korshinskii* and *Hippophae rhamnoides* in Loess Plateau of Northwest China〔J〕. Chinese Journal of Applied Ecology,2012,23(9):2 383－2 389.〕

〔9〕 李振新,欧阳志云,郑华,等. 岷江上游两种生态系统降雨分配的比较〔J〕. 植物生态学报,2006,30(5):723－731.〔Li Zhenxin,Ouyang Zhiyun,Zheng Hua,et al. Comparison of rainfall redistribution in two ecosystems in Minjiang upper catchments,China〔J〕. Chinese Journal of Plant Ecology,2006,30(5):723－731.〕

〔10〕 Li X R,Zhang Z S,Tan H J. Ecological restoration and recovery in the wind-blown sand hazard areas of Northern China:Relationship between soil water and carrying capacity for vegetation in the Tengger Desert〔J〕. Science China Life Sciences,2014,57(5):539－548.

〔11〕 D'Onofrio D,Baudena M,D'Andrea F. Tree-grass competition for soil water in arid and semiarid savannas:The role of rainfall intermittency〔J〕. Water Resources Research,2015,51(1):169－181.

〔12〕 Mccarter C P R,Price J S. The hydrology of the Bois-des-Bel bog peatland restoration:10 years post-restoration〔J〕. Ecological Engineering,2013,55(3):73－81.

〔13〕 Siegert C M,Levia D F. Seasonal and meteorological effects on differential stemflow funneling ratios for two deciduous tree species〔J〕. Journal of Hydrology,2014,519(Part A):446－454.

〔14〕 Sun X, Onda Y, Kato H. Effect of strip thinning on rainfall interception in a Japanese cypress plantation〔J〕. Journal of Hydrology, 2015, 525:607 - 618.

〔15〕 Kaushal R, Kumar A, Alam N M. Effect of different canopy management practices on rainfall partitioning in *Morus alba*〔J〕. Ecological Engineering, 2017, 102:374 - 380.

〔16〕 Iida S, Levia D F, Shimizu A. Intrastorm scale rainfall interception dynamics in a mature coniferous forest stand〔J〕. Journal of Hydrology, 2017, 548:770 - 783.

〔17〕 黄德卫,张德强,周国逸,等. 鼎湖山针阔叶混交林优势种树干液流特征及其与环境因子的关系〔J〕. 应用生态学报, 2012, 23(5):1 159 - 1 166.〔Huang Dewei, Zhang Deqiang, Zhou Guoyi, et al. Characteristics of dominant tree species stem sap flow and their relationships with environmental factors in a mixed conifer-broadleaf forest in Dinghushan, Guangdong Province of South China〔J〕. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(5):1 159 - 1 166.〕

〔18〕 王艳兵,德永军,熊伟,等. 华北落叶松夜间树干液流特征及生长季补水格局〔J〕. 生态学报, 2013, 33(5):1 375 - 1 385.〔Wang Yanbing, De Yongjun, Xiong Wei, et al. The characteristics of nocturnal sap flow and stem water recharge pattern in growing season for a *Larix* principis-rupprechtii plantation〔J〕. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(5):1 375 - 1 385.〕

〔19〕 徐丹丹,尹立河,侯光才,等. 毛乌素沙地旱柳和小叶杨树干液流密度及其与气象因子的关系〔J〕. 干旱区研究, 2017, 34(2):375 - 382.〔Xu Dandan, Yin Lihe, Hou Guangcai, et al. Relationships between sap flow densities in tree trunks of *Salix matsudana* and *Populus simonii* and meteorological factors in the Mu Us Sandland〔J〕. Arid Zone Research, 2017, 34(2):375 - 382.〕

〔20〕 Rodriguez-Dominguez C M, Ehrenberger W. Concomitant measurements of stem sap flow and leaf turgor pressure in olive trees using the leaf patch clamp pressure probe〔J〕. Agricultural Water Management, 2012, 114(6):50 - 58.

〔21〕 Carlyle-moses D E. Throughfall, stemflow, and canopy interception loss fluxes in a semi-arid Sierra Madre Oriental matorral community〔J〕. Journal of Arid Environments, 2004, 58(2):181 - 202.

〔22〕 杨志鹏,李小雁,孙永亮,等. 毛乌素沙地沙柳灌丛降雨截留与树干茎流特征〔J〕. 水科学进展, 2008, 19(5):693 - 698.〔Yang Zhipeng, Li Xiaoyan, Sun Yongliang, et al. Characteristics of rainfall interception and stemflow for *Salix psammophila* in Maowusu sandland, Northwest China〔J〕. Advances in Water Science, 2008, 19(5):693 - 698.〕

〔23〕 张立恒,王学全,贾志清,等. 高寒沙地不同林龄中间锦鸡儿人工林根系分布特征〔J〕. 干旱区资源与环境, 2018, 32(11):163 - 168.〔Zhang Liheng, Wang Xuequan, Jia Zhiqing, et al. Root distribution characteristics of *Caragana intermedia* plantations at different ages in alpine sandy land〔J〕. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018, 32(11):163 - 168.〕

〔24〕 宋乃平,杨明秀,王磊,等. 荒漠草原区人工柠条林土壤水分周年动态变化〔J〕. 生态学杂志, 2014, 33(10):2 618 - 2 624.〔Song Naiping, Yang Mingxiu, Wang Lei, et al. Monthly variation in soil moisture under *Caragana intermedia* stands grown in desert〔J〕. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(10):2 618 - 2 624.〕

〔25〕 何凌仙子,贾志清,刘涛,等. 高寒沙地中间锦鸡儿和柠条锦鸡儿细根分解动态特征〔J〕. 林业科学, 2018, 54(2):162 - 169.〔Heling Xianzi, Jia Zhiqing, Liu Tao, et al. Dynamic characteristics of fine root decomposition of two *Caragana* species with in alpine sandy land〔J〕. Scientia Silvae Sinicae, 2018, 54(2):162 - 169.〕

〔26〕 杨新国,赵伟,陈林,等. 荒漠草原人工柠条林土壤与植被的演变特征〔J〕. 生态环境学报, 2015, 24(4):590 - 594.〔Yang Xinguo, Zhao Wei, Chen Lin, et al. Antidromal succession between soil and plant in the *Caragana intermedia* shrubland in the desert steppe〔J〕. Ecology and Environment, 2015, 24(4):590 - 594.〕

〔27〕 Sumani N. Canopy interception on tree architecture models of aubreville, stone and leeuwenberg in lore lindu national park area, Indonesia〔J〕. Journal of Biodiversity & Environmental Sciences, 2017, 10(2):75 - 88.

〔28〕 Hanchi A, Rapp M. Stemflow determination in forest stands〔J〕. Forest Ecology & Management, 1997, 97(3):231 - 235.

〔29〕 Yuan C, Gao G, Fu B. Stemflow of a xerophytic shrub (*Salix psammophila*) in Northern China: Implication for beneficial branch architecture to produce stemflow〔J〕. Journal of Hydrology, 2016, 539:577 - 588.

〔30〕 刘亚,阿拉木萨,曹静. 科尔沁沙地樟子松林降雨再分配特征〔J〕. 生态学杂志, 2016, 35(8):2 046 - 2 055.〔Liu Ya, Alamusa, Cao Jing. Characteristics of rainfall partitioning by *Pinus sylvestris* var. *mongolica* forest canopy in Horqin Sandy Land, Northern China〔J〕. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(8):2 046 - 2 055.〕

〔31〕 Zhang Y F, Wang X P, Hu R. Rainfall partitioning into throughfall, stemflow and interception loss by two xerophytic shrubs within a rain-fed re-vegetated desert ecosystem, Northwestern China〔J〕. Journal of Hydrology, 2015, 527:1 084 - 1 095.

〔32〕 杨志鹏,李小雁,刘连友,等. 毛乌素沙地固沙灌木树干茎流特征〔J〕. 科学通报, 2008, 53(8):939 - 945.〔Yang Zhipeng, Li Xiaoyan, Liu Lianyou, et al. Characteristics of stemflow for desert shrubs in Mu Us Sandland, Northwest China〔J〕. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(8):939 - 945.〕

〔33〕 李衍青,张铜会,赵学勇,等. 科尔沁沙地小叶锦鸡儿灌丛降雨截留特征研究〔J〕. 草业学报, 2010, 19(5):267 - 272.〔Li Yanqing, Zhang Tonghui, Zhao Xueyong, et al. Rainfall interception and stemflow for *Caragana microphylla* in Horqin Sandy Land, Northern China〔J〕. Acta Prataculturae Sinica, 2010, 19(5):267 - 272.〕

〔34〕 岳祥飞,崔建垣,张铜会,等. 科尔沁沙地黄柳灌丛降雨截留与再分配特征〔J〕. 草业学报, 2013, 22(6):46 - 52.〔Yue Xiangfei, Cui Jianheng, Zhang Tonghui, et al. Characteristics of rainfall interception and redistribution for *Salix gordejevii* in Horqin Sandy Land, Northeast China〔J〕. Acta Prataculturae Sinica, 2013, 22(6):46 - 52.〕

〔35〕 刘章文,陈仁升,宋耀选,等.祁连山典型灌丛降雨截留特征〔J〕.生态学报,2012,32(4):333-342.〔Liu Zhangwen,Chen Rensheng,Song Yaoxuan,et al. Characteristics of rainfall interception for four typical shrubs in Qilian Mountain〔J〕. Acta Ecologica Sinica,2012,32(4):333-342.〕

〔36〕 任世奇,项东云,肖文发,等.广西南宁桉树人工林降雨再分配特征〔J〕.生态学杂志,2017,36(6):1 473-1 480.〔Ren Shiqi,Xiang Dongyun,Xiao Wenfa,et al. Rainfall redistribution of *Eucalypt* plantation in Nanning,Guangxi,China〔J〕. Chinese Journal of Ecology,2017,36(6):1 473-1 480.〕

〔37〕 田野宏,满秀玲,刘茜,等.大兴安岭北部白桦次生林降雨再分配特征研究〔J〕.水土保持学报,2014,28(3):109-113.〔Tian Yehong,Man Xiuling,Liu Qian et al. Research on rainfall redistribution of *Betula platyphylla* secondary forests in North of Greater Xing'an Mountains〔J〕. Journal of Soil and Water Conservation,2014,28(3):109-113.〕

Redistribution of Rainfall in Canopy of *Caragana intermedia*

TIAN Na[1,2], GU Jun-long[1,2], YANG Xin-guo[1,2], WANG Lei[1,2], WANG Xing[1,2], CHEN Lin[1,2], SONG Nai-ping[1,2]

(1. *Key Laboratory for Degenerated Ecosystem in Northwest China under the Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan* 750021, *Ningxia, China*;

2. *Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwest China, Yinchuan* 750021, *Ningxia, China*)

Abstract: In this study, the effects of rainfall and its intensity on the throughfall, stemflow and interception of two kinds of shrubberies (healthy and degenerated groups) of *Caragana intermedia* planted in a desert steppe were examined. Results showed that: ① 33 effective rainfall events were observed during the experiment, and the total volume, average volume and average intensity of rainfall were 251 mm, 7.6 mm and 1.14 mm · h^{-1}, respectively. In which the frequency of rainfall events with volume 2 mm and intensity 1 mm · h^{-1} was the highest. ② There were the significant differences ($P < 0.05$) in the throughfall and interception between the healthy and degenerated groups, and the average percentages of throughfall, stemflow and interception were 66.7%, 8.5% and 24.8% in the healthy group and 75.4%, 8.7% and 16.0% in the degenerated group, respectively. ③ The throughfall, stemflow and interception of the two kinds of shrubberies had the linear, logarithmic and power functions with rainfall, and the percentages of throughfall, stemflow and interception had the logarithmic and power relationships with rainfall and rainfall intensity. The morphological degeneration of the shrubberies changed significantly the redistribution pattern of rainfall in canopy, thus the canopy interception was significantly reduced, but the throughfall was significantly increased, which were beneficial to potentially improve soil moisture content and maintain the stability of *C. intermedia* shrubberies.

Key words: desert steppe; *Caragana intermedia*; throughfall; stemflow; interception; morphological degeneration; Mu Us Desert